

УДК 622.831

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СДВИЖЕНИЯ ПОДТОПЛЯЕМОГО ГРУНТА И РАЗРУШЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МОКРОГО ПОГАШЕНИЯ ШАХТЫ

Назимко И. В., Педченко С. В., Васютина В. В.
(УкрНИИМИ, г. Донецк, Украина)

*Проведено комп'ютерне моделювання деформування наф-
тосховища у результаті підняття рівня ґрунтових вод.*

*Numerical modeling of deformation oil tank has been carried
out due to rise of the underground water level.*

Устойчивость наземных сооружений существенно зависит от активизации подвижек грунта, вероятность которой резко увеличивается при поднятии уровня грунтовых вод. Особенно это опасно в случаях, когда объекты сооружаются над выходами тектонических нарушений. При мокром погашении угольной шахты происходит поднятие уровня грунтовых вод, в результате чего свойства наносов изменяются. Как показывает практика, это приводит к неизбежной активизации сдвижений земной поверхности и часто разрушению наземных сооружений [1].

Вероятность разрушений наземных объектов существенно возрастает в том случае, когда они сооружены над или в непосредственной близости к выходам на земную поверхность дизъюнктивных нарушений [2]. В данной статье рассмотрен случай разрушения нефтехранилища, в виде цилиндрической металлической емкости, которое сооружено над разрывным нарушением, причем активизация сдвижений грунта и коренных пород по плоскости сместителя происходит в результате повышения уровня грунтовых вод и подтопления грунта в основании емкости.

Исследования напряженно-деформированного состояния грунта и емкости в окрестности тектонического нарушения осуществлялось путем численного решения системы дифференциальных уравнений движения (второго закона Ньютона) и зависимостей, связывающих напряжения и деформации в твердом теле [3 - 5]. Родоначальником данного алгоритма является проф. П. Кундалл, который впервые предложил использовать второй закон Ньютона для прямого описания процессов сдвижения массива горных пород.

Согласно этому алгоритму дифференциальные уравнения движения массива горных пород записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt},$$

где $\sigma_{i,j}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в массиве горных пород, Па;

x_i – координаты декартовой системы, м;

ρ – плотность горных пород, кг/м³;

b_i – удельные силы, развивающиеся в массиве горных пород, и приводимые к единице его массы Н/кг;

v_i – скорость движения элементарных объемов массива горных пород, м/с;

t – время, с.

В общем случае решается система дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнения второго закона Ньютона в дифференцированной форме и уравнений, описывающих прочностные модели массива горных пород. Таких моделей на сегодня насчитывается большое количество, а на практике применяется чаще всего около десятка моделей. Расчеты производились с помощью модели, описывающей условие предельного состояния Кулона-Мора, которая наиболее адекватно описывает прочность осадочных горных пород.

Предполагается, что порода теряет прочность либо от предельных касательных напряжений, либо от растягивающих. Предельное состояние пород описывается следующими уравнениями

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\Phi + 2c\sqrt{N_\Phi},$$

а при разрыве сплошности массива под действием растягивающих напряжений

$$f^t = \sigma_3 - \sigma_t,$$

где $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$ представляет собой уравнение поверхности текучести;

σ_1 и σ_3 главные минимальное и максимальное нормальные напряжения, причем $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$;

$$N_\Phi = (1 + \sin \Phi) / (1 - \sin \Phi);$$

Φ – угол внутреннего трения;

C – сцепление.

Численное дифференцирование уравнений осуществляется шагами по трем пространственным переменным и одной временной переменной. Таким образом, осуществляется решение задачи необратимых сдвижений массива горных пород в окрестности нефтехранилища, фундамента и наносов в зоне нарушения.

В связи с тем, что в качестве емкости нефтехранилища используется металлическая конструкция, дополнительно использованы средства метода конечных элементов, который подходит к описанию напряжено-деформированного состояния металлических оболочек. Такой гибридный метод обеспечил возможности детального исследования напряженно-деформированного состояния системы. Наглядное преимущество такого метода заключается в том, что моделирование дает возможность адекватно отразить величины смещений грунта, основания нефтехранилища, а также деформации стенок емкости, которая наполнена нефтепродуктами.

Участок наносов земной поверхности представлен прямоугольной призмой размерами $60 \times 60 \times 15$ м (рис. 1). Цилиндрическая емкость имеет радиус 10 м и высоту 20 м. Емкость установлена на бетонный фундамент. Модуль деформации для наносов принимался 4,5 ГПа, модуль сдвига 2,8 ГПа, угол внутреннего трения 27° , сцепление 1 МПа, предел прочности на растяжение 1 МПа, на сжатие – 6 МПа. Плотность наносов составляет 2200 кг/м³, угол дилатансии 8° . Модуль упругости стали прини-

мался в 25 ГПа, предел текучести 250 МПа, плотность 7700 кг/м³. Модуль деформации для бетона составлял 10 ГПа, модуль сдвига 6 ГПа, угол внутреннего трения 32 °, сцепление 2 МПа. Плотность бетона – 3000 кг/м³, угол дилатансии 10 °.

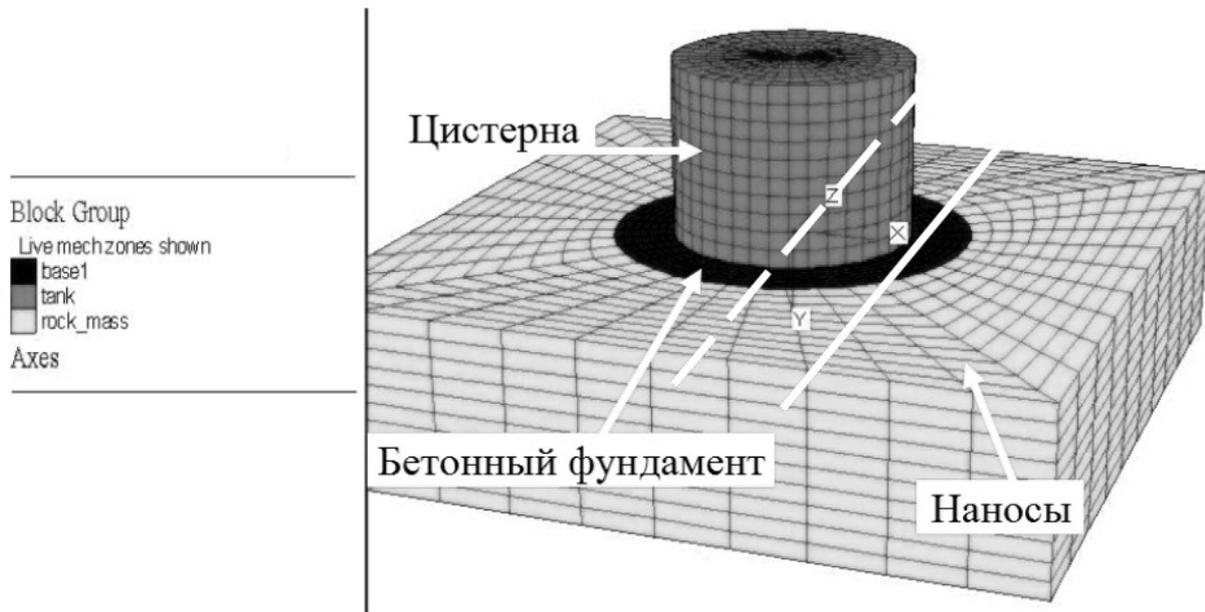


Рис. 1. Расчетная схема

Задача о распределении напряжений и деформаций в системе емкость-основание – грунт решалась в несколько этапов, для удовлетворения начального состояния системы и соблюдения граничных условий. Так перед активизацией подвижек грунта вокруг тектонического нарушения осуществлялся расчет напряженного состояния системы сразу после ее строительства. На рисунках 1а и 1б видно, что сжимающие нормальные напряжения сосредоточены под цистерной и увеличиваются с ростом глубины. Характерно, что под емкостью в глубине грунта присутствует повышенное давление, вызванное дополнительным весом нефтеемкости. Такой предрасчет гарантирует правильность дальнейшего анализа и дает возможность проверять надежность модели на всех этапах моделирования.

Моделируемое время от начала обводнения до разрушения основания и емкости составляло 280000 циклов, что соответствовало 8,5 неделям или 60 дням.

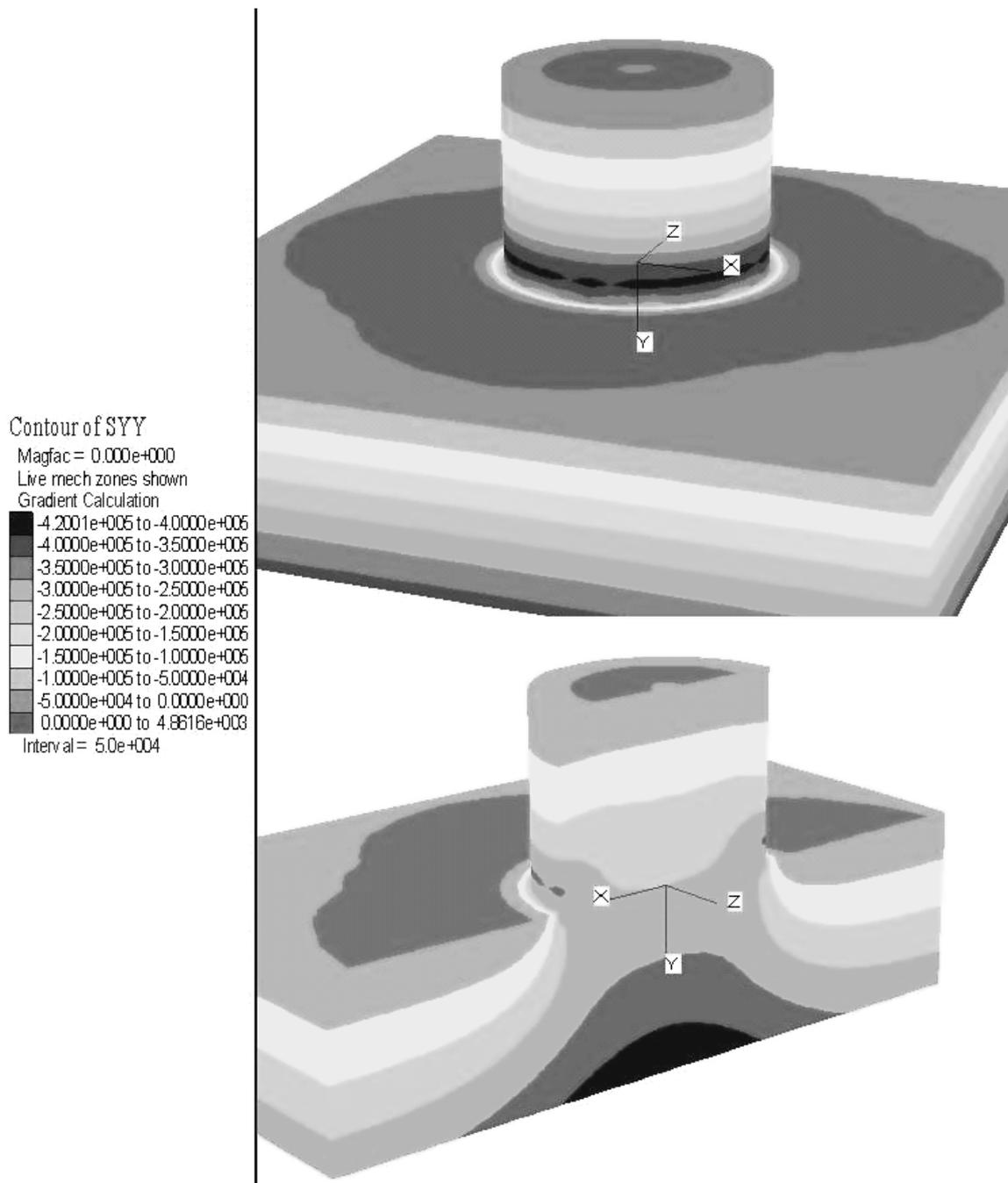


Рис. 1а. Распределение вертикальной компоненты нормальных напряжений

В связи с тем, что толщина стенки цистерны и размеры элементов грунта существенно отличаются, цистерну принимали эквивалентной реальной таким образом, чтобы толщина стенок была больше (соизмеримая с примыкающими элементами основания и наносов), а прочность материала стенок пропорционально уменьшалась.

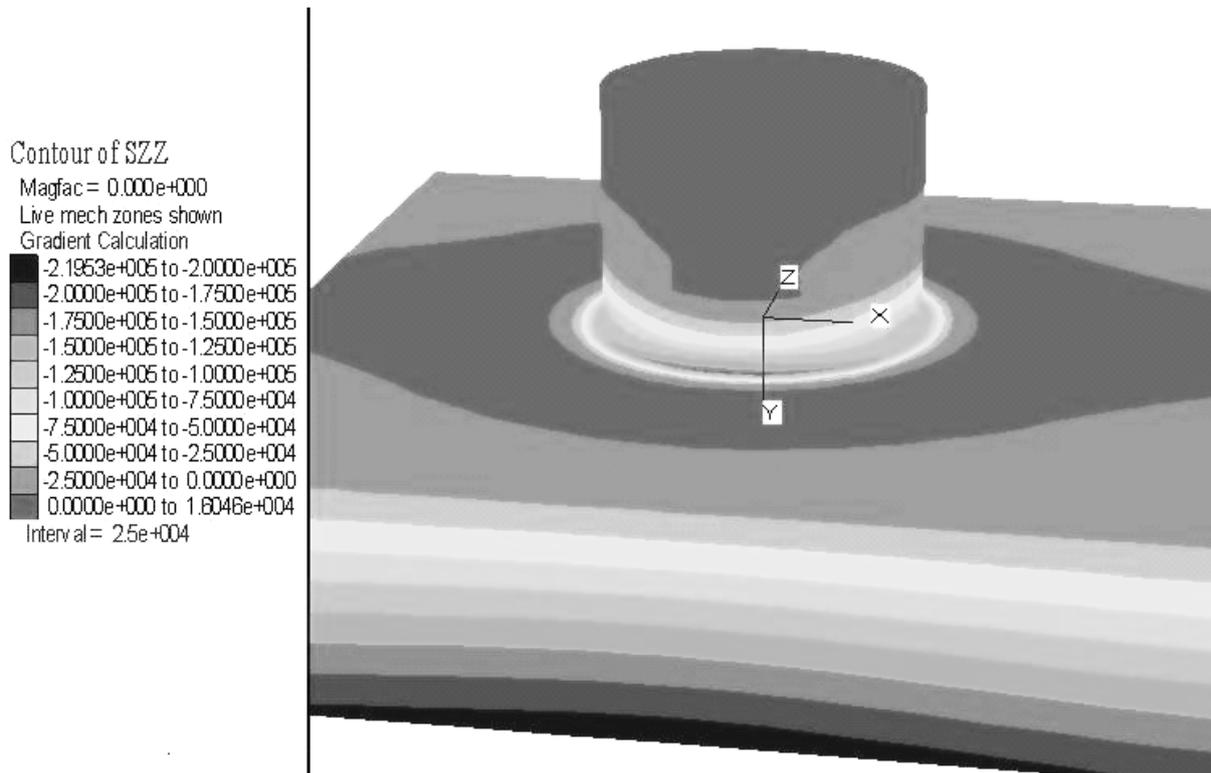


Рис. 1б. Распределение нормальных горизонтальных напряжений

Под емкостью в грунте расположено тектоническое нарушение. Сместитель нарушения показан на рисунке 1 пунктиром, а сплошная линия (сместенная на 5 м вправо) указывает границу висячего крыла нарушения, которое распространяется вправо от оси симметрии на рисунке 1 (вдоль оси X).

В результате обводнения сместителя нарушения происходит оседание висячего бока вдоль плоскости сместителя, что смоделировано в виде просадки грунта справа от сплошной линии со скоростью порядка 5-10 мм/нед. В результате такой просадки возникает активизация сдвижений наносов, распределение которых приведено на рисунке 2.

Вначале происходили оседания – консолидация грунта и основания при наполнении цистерны, а затем после затопления шахты – активизации подвижек вдоль сместителя. Эти сдвигения сопровождаются переходом грунта, основания хранилища в запредельное состояние. Области предельного состояния, обусловленного растяжением, указаны позицией 1.

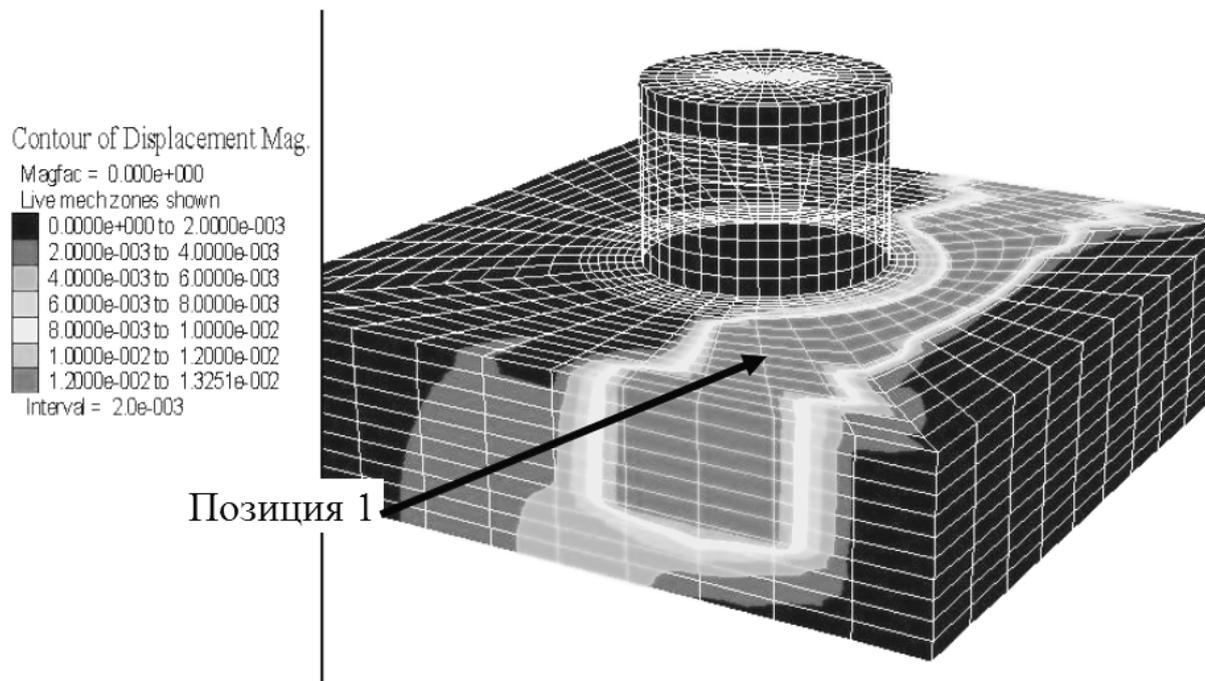


Рис. 2. Контурная карта полных сдвижений грунта и нефтехранилища

Постепенно в запредельное состояние переходит нижняя часть цистерны от растягивающих напряжений. В таких случаях внизу цистерны будут возникать течи, вызванные трещинами отрыва и сдвига в стали. Однако даже если эти трещины заваривать, процесс запредельного состояния развивается вверх по боковой стенке цистерны со стороны висячего крыла нарушения.

На рисунке 3 показан процесс разрушения системы на последнем этапе моделирования. На этом этапе наиболее активные разрушения происходят на контакте грунта и бетонного основания. Проседание и разрушение грунта, после коллапса фундамента, сопровождается опусканием стенки цистерны со стороны нарушения и некоторым поднятием противоположной стенки с противоположной стороны (рис. 4).

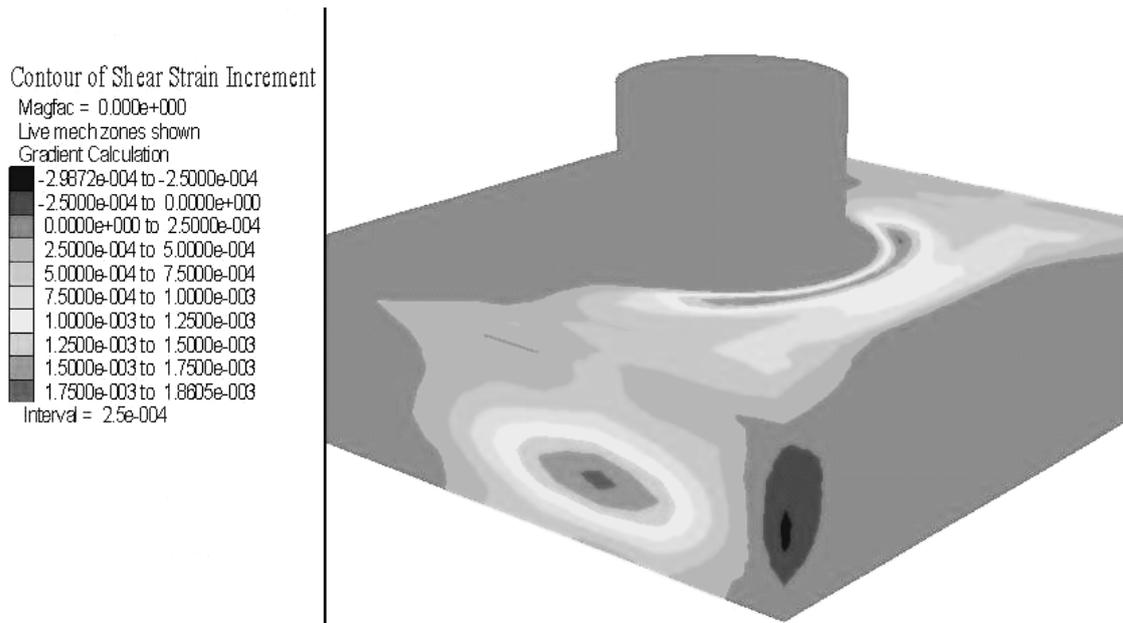


Рис. 3. Развитие зон запредельного состояния вокруг нефтехранилища

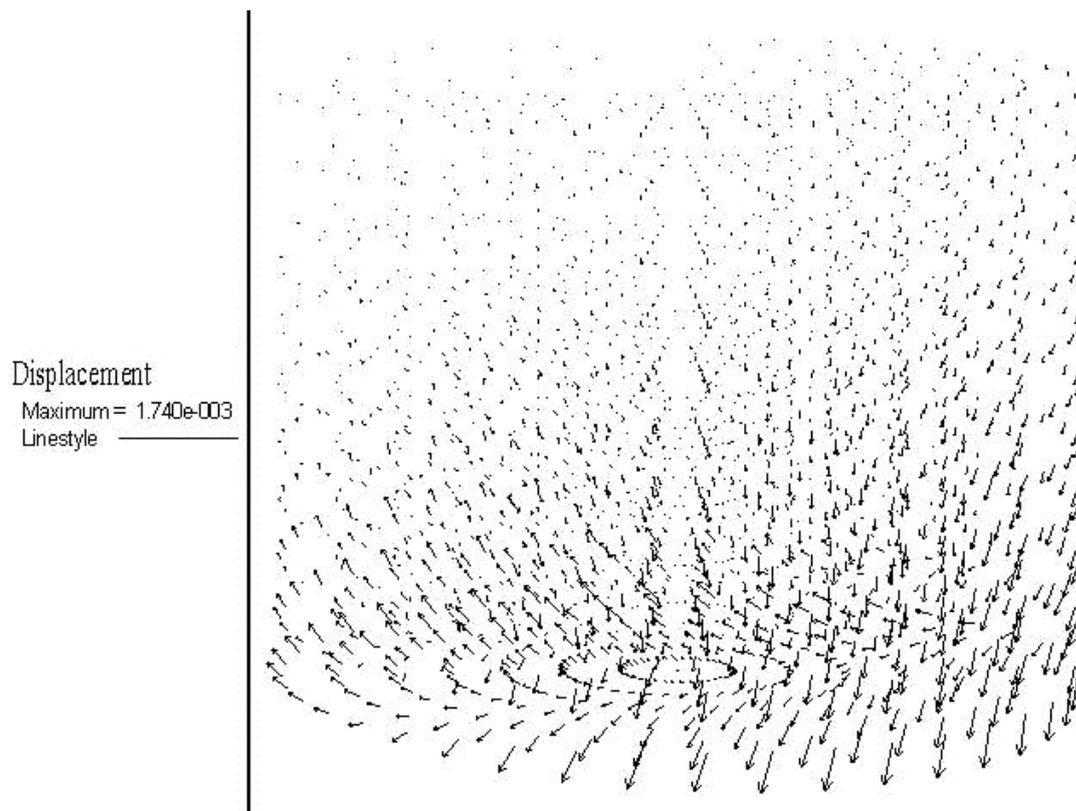


Рис. 4. Поле смещений корпуса нефтехранилища после активизации сдвижений грунтового основания (максимум смещений равен 1,7 мм)

Со стороны висячего крыла нарушения в стенке цистерны генерируются вертикальные растягивающие напряжения, которые и вызывают переход стальной оболочки в запредельное состояние (область 1 на рис. 5).

Характерно, что именно у основания цистерны растяжение наблюдается и в боковом направлении (параллельном поверхности грунта – рис. 6). Именно такое сочетание растяжений в двух плоскостях обусловило первоочередное зарождение трещин в нижней части хранилища, что привело к разрушению емкости и основания (рис. 7).

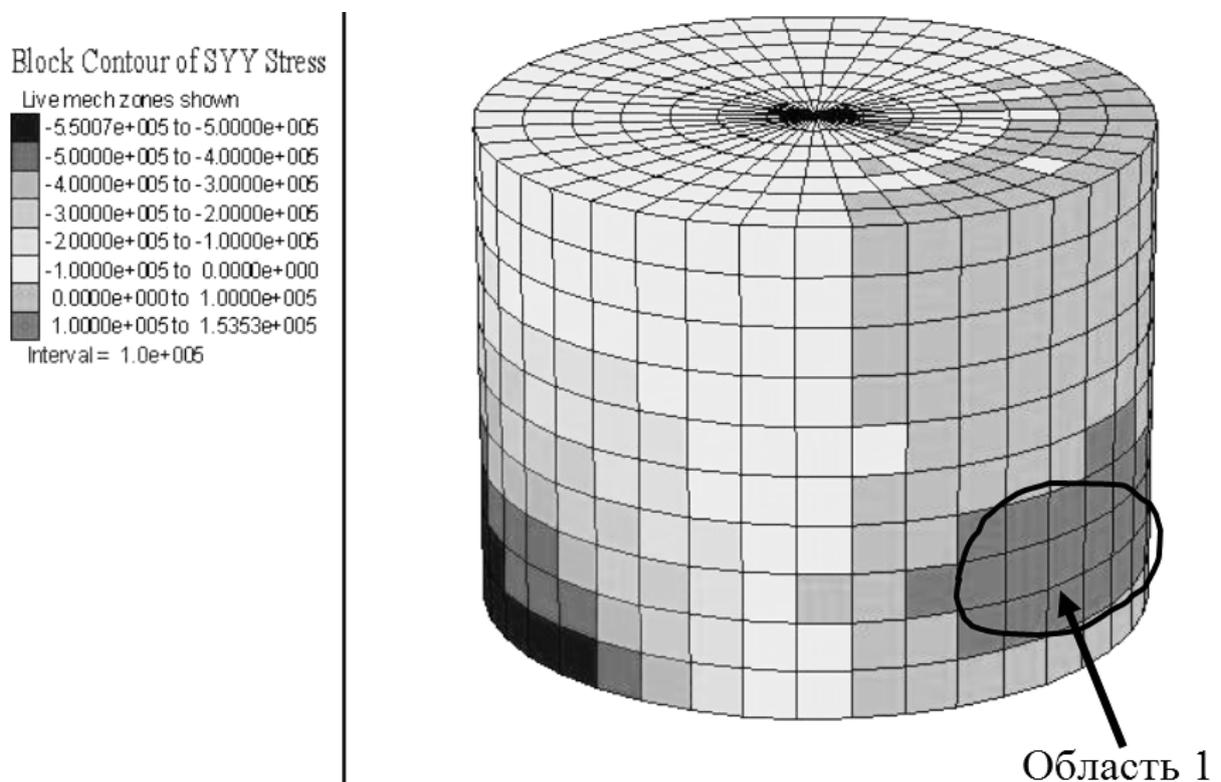


Рис. 5. Распределение вертикальной компоненты напряжений в хранилище после активизации сдвижений грунтового основания

Block Contour of SZZ Stress
Live mechzones shown

█	-1.4989e+005 to -1.2500e+005
█	-1.2500e+005 to -1.0000e+005
█	-1.0000e+005 to -7.5000e+004
█	-7.5000e+004 to -5.0000e+004
█	-5.0000e+004 to -2.5000e+004
█	-2.5000e+004 to 0.0000e+000
█	0.0000e+000 to 2.5000e+004
█	2.5000e+004 to 5.0000e+004
█	5.0000e+004 to 7.5000e+004
█	7.5000e+004 to 1.0000e+005
█	1.0000e+005 to 1.2500e+005
█	1.2500e+005 to 1.3877e+005

Interval = 2.5e+004

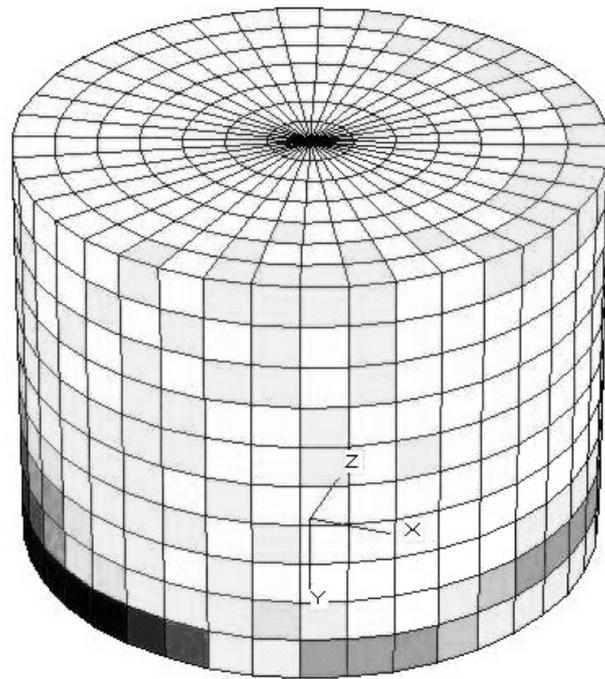


Рис. 6. Распределение горизонтальных напряжений вдоль оси, параллельной плоскости сместителя дизъюнктива

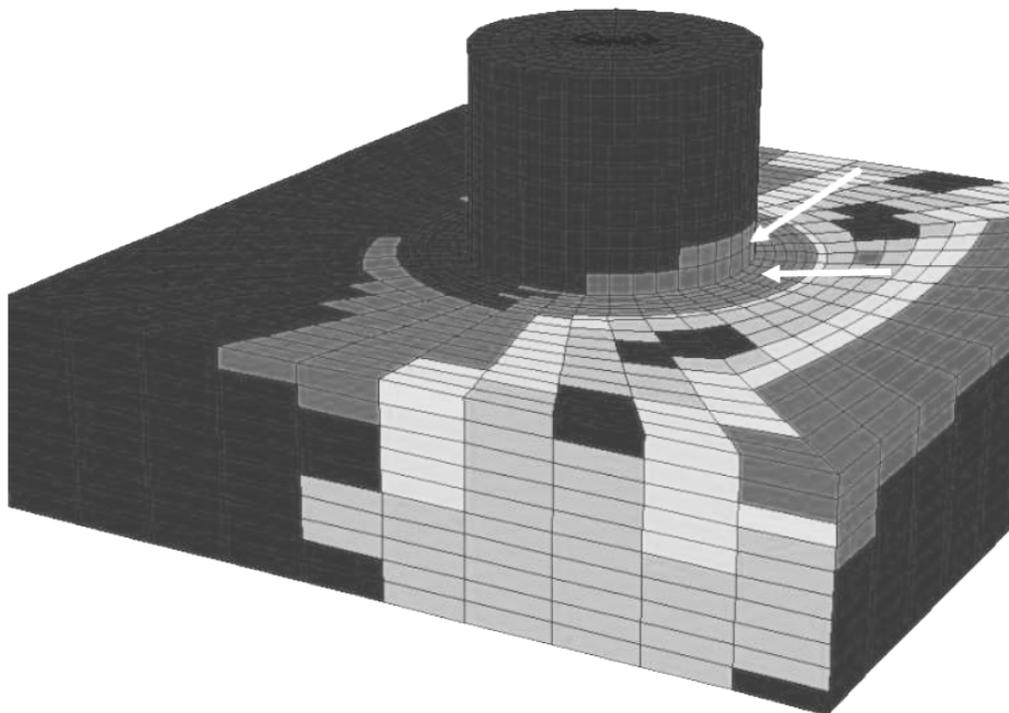


Рис. 7. Области разрушения грунтового основания и цистерны (показаны стрелками)

ВЫВОДЫ

Таким образом, предоставлена и исследована модель для исследования деформирования нефтехранилища, сооруженного на основании, возведенного в наносах, которые претерпевают активизацию сдвижений в окрестности сместителя нарушения после затопления шахты. Это позволит в дальнейшем прогнозировать динамику разрушения объектов в результате действий техногенного характера.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Гавриленко Ю.Н. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины / Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков, Ю.Ф. Кренида и др. – Донецк: "Норд-Пресс", 2004. – 631 с.
2. Гавриленко Ю.Н. Исследование особенностей образования и развития оползня / Ю.Н. Гавриленко, Петрушин А.Г. // Проблеми гірського тиску. Збірник наукових праць ДонНТУ. Донецьк, № 10, 2003. – С. 5 – 21.
3. Cundall, P., and M. Board. (1988) "A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems," in Numerical Methods in Geomechanics. // Proceedings of the 6th International Conference, Innsbruck, Austria, April 1988, pp. 2101-2108, G. Swoboda, Ed. Rotterdam: Balkema, 1988.
4. Метод конечных элементов в механике твердых тел. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 511 с.